

Article, Published Version

Schmitt-Heiderich, Peter; Belzner, Fabian

Verfahren zur Parametrisierung von PI-Reglern einer automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung

BAWMitteilungen

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102552>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Schmitt-Heiderich, Peter; Belzner, Fabian (2012): Verfahren zur Parametrisierung von PI-Reglern einer automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung. In: BAWMitteilungen 96. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 123-134.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Verfahren zur Parametrisierung von PI-Reglern einer automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung

Method for the Parameterisation of the PI Controllers for Automated Discharge and Water Level Control

Dr.-Ing. Peter Schmitt-Heiderich, M. Eng. Fabian Belzner, Bundesanstalt für Wasserbau

In diesem Beitrag wird ein datenbankgestütztes Verfahren zur Dimensionierung der Wasserstandsregler der automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung vorgestellt, die üblicherweise als PI-Regler realisiert werden. Es wird gezeigt, dass eine mathematische Optimierung der Reglerparameter hier weniger geeignet ist, da bei jedem Ziel mehrere Parameterkombinationen zu einer vergleichbaren Zielerfüllung führen. Mit Hilfe der datenbankgestützten Parametrisierung können hingegen beliebige Kriterien (Ziele) berücksichtigt und über eine Bewertung des untersuchten Reglerparameterraumes brauchbare Parameter identifiziert werden. Diese Vorgehensweise ist standardisiert und damit auf beliebige staugeregelte Gewässer übertragbar.

Zusätzlich zur standardisierten Vorgehensweise sind weiterhin individuelle Betrachtungen und Untersuchungsmethoden anzuwenden, mit denen die Regelung verbessert werden kann, wenn die Stauhaltung Besonderheiten aufweist. Dies wird am Beispiel einer Mischwassereinleitung aus dem Stuttgarter Stadtgebiet in die Neckarstauhaltung Hofen gezeigt.

In this article, we will discuss a database-assisted method for the dimensioning of water level controllers for automated discharge and water level control, which are usually implemented in the form of PI controllers. We will show that a mathematical optimisation of the control parameters is less suitable in this case, as for each target several combinations of parameters may lead to a similar target result. With the help of database-assisted parameterisation, on the other hand, random criteria (targets) can be allowed for and usable parameters identified by means of an evaluation of the control parameter range that has been studied. This approach is standardised and so can also be applied to any impounded body of water.

In addition to the standardised approach, individual

considerations and study methods should be applied that can contribute to improving the control if the impoundment has any special features. This is shown using the example of the combined sewer inflow from the Stuttgart urban area into the impounded section of the Neckar at Hofen.

1 Parameter des OW/Q-Reglers *Parameters of the OW/Q controller*

Die Aufgabe der Dimensionierung des Wasserhaushaltsreglers (OW/Q-Regler) beschränkt sich nicht nur auf die Bereitstellung des Parametersatzes, sondern beinhaltet auch die Implementierung des Regelalgorithmus auf einer Zielplattform, die Inbetriebnahme sowie die Betreuung des Wirkbetriebes. Diese erweiterten Fragestellungen werden in den Beiträgen von Wohlfart und Gebhardt (2012) und Gebhardt und Wohlfart (2012) in diesen BAWMitteilungen aufgegriffen. Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf die Parametrisierung des Wasserstandsreglers, der üblicherweise als PI-Regler realisiert wird und den OW-Anteil des OW/Q Reglers beschreibt. Unbeachtet bleiben hierbei die Anforderungen an Hardware, Schnittstellendefinitionen, Übertragungstechnik, Datensicherheit, Datenkonsistenz und Visualisierung der maßgebenden Prozesse auf der Leitungsebene.

Für einen Wasserhaushalts- bzw. OW/Q-Regler sind durch die BAW folgende Teilalgorithmen zu entwerfen und zu parametrisieren:

- Filterdesign
- Störgrößenaufschaltung (Q-Anteil des OW/Q-Reglers)
- Wasserstandsreger: PI-Regler (OW-Anteil des OW/Q-Reglers)
- Sollwertbildung (Abflussabhängigkeit des Stauzieles)

- Sonderfallbetrachtung (Turbinenschnellschluss, Schleusen, Mischwassereinleitungen etc.)

Alle Teilalgorithmen tragen das Potenzial in sich, die Wasserhaushaltsregelung zu destabilisieren und bei fehlerhafter Auslegung den Wasserstand in der Regelstrecke zum Schwingen anzuregen. Die gleichzeitige Dimensionierung aller Parameter ist nicht zielführend, da ungünstig gewählte Parameter durch Überlagerungseffekte zufällig zu einem guten Regelungsverhalten führen können. Filter, Störgrößenaufschaltung, PI-Regler und Sollwertbildung müssen daher unabhängig voneinander dimensioniert und auf Stabilität überprüft werden.

Bei abflussabhängigen Stauzielen kann der Sollwert bei Überschreitung eines Abflussschwellenwertes nicht schlagartig auf das neue Stauziel gesetzt werden, sondern muss mit einem vorgegebenen Gradienten kontinuierlich nachgeführt werden. Das Stauziel an den Moselstauhaltungen wird beispielsweise um 20 cm abgesenkt, wenn der Gesamtabfluss 400 m³/s übersteigt. Hierbei wird das Stauziel mit einer Geschwindigkeit von 10 cm/h abgesenkt. Für die Moselstauhaltung Müden wird dies exemplarisch am Hochwasser vom März 1995 in BAW (2004) aufgezeigt.

Die Dimensionierung der Störgrößenaufschaltung und der Filter wird in zwei Beiträgen in diesen BAWMitteilungen ausführlich erläutert (Schmitt-Heiderich und Gebhardt, 2012; Gebhardt et al., 2012). In diesem Kontext können daher Steuerungsanteil und Filter als parametrisiert vorausgesetzt werden.

Die für den Wasserhaushaltsregler noch fehlenden Parameter des PI-Reglers werden unabhängig vom Steuerungsanteil ermittelt. Die Messfilter sind zwar aktiv, jedoch von untergeordneter Bedeutung, da schiffs- und windinduzierte Wellen im 1D-HN-Modell nicht berücksichtigt werden.

In Abschnitt 2 wird ein standardisiertes Verfahren beschrieben, mit dem die Parametrisierung des PI-Reglers erfolgt und welches für die meisten Stauhaltungen angewandt werden kann. Die beschriebene Methode muss nur noch um Sonderfallbetrachtungen erweitert werden, wenn es die speziellen örtlichen Gegebenheiten und Restriktionen erfordern. Eine solche ergänzende Untersuchung zur Parametrisierung des PI-Reglers

wird in Abschnitt 3 beschrieben, die den Sonderfall einer Mischwassereinleitung in die Neckarstauhaltung Hofen behandelt.

2 Bestimmung der Reglerparameter (OW-Anteil)

Determination of controller parameters (OW proportion)

2.1 PI-Regler

PI controller

In den meisten Fällen nutzt man für die Wasserstandsregelung einen proportional-integral wirkenden (PI-) Regler, dessen Proportionalanteil über die Konstante k_P verstärkt wird, die man auch als Kreisverstärkung k_R bezeichnet. Der Integralanteil wird über die Konstante k_I oder über die Nachstellzeit T_N mit dem Quotienten k_R/T_N bestimmt (Gl. 1). Gegenüber einem P-Regler hat die Kombination aus Proportional- und Integralanteil den Vorteil, dass keine bleibende Regelabweichung verbleibt und der Wasserstand immer wieder auf den Sollwert zurückgeführt wird.

$$\begin{aligned} Q_{PI}(t) &= k_P \cdot \Delta H(t) + k_I \cdot \int_0^t \Delta H(t) \cdot dt \\ &= k_R \cdot \left[\Delta H(t) + \frac{1}{T_N} \cdot \int_0^t \Delta H(t) \cdot dt \right] \quad (1) \end{aligned}$$

Q_{PI}	[m ³ /s]	Abflussgröße aus dem PI-Regleralgorithmus
ΔH	[m]	Regelabweichung ($H_{Soll} - H$)
H_{Soll}	[m]	Sollwasserstand
H	[m]	Istwasserstand
k_R, k_P	[m ² /s]	Reglerparameter ($k_R = k_P$)
k_I	[m ² /s ²]	Reglerparameter
T_N	[s]	Nachstellzeit ($T_N = k_P / k_I$)

Auf Grund ihrer Anschaulichkeit wird häufig die Nachstellzeit T_N als Reglerparameter für den Integralanteil genutzt, woraus sich eine Abhängigkeit vom Proportionalanteil ergibt. Die Nachstellzeit entspricht dann genau der Zeit, die benötigt wird, bis der Integral- dem Proportionalanteil entspricht, wenn die Regelabweichung ΔH konstant ist. Der PI-Regler ist im Vergleich zum reinen I-Regler um die Nachstellzeit schneller. Eine

große Nachstellzeit führt zu einer langsamen Reaktion des Integralanteils und umgekehrt.

2.2 Datenbank-gestützte Simulation von Reglervarianten

Database-assisted simulation of control variants

Da der PI-Regler rückkoppelnd auf die Regelstrecke wirkt, ist die Wirkung der Reglerparameter k_R und T_N abhängig von der Regelstrecke, den Stellorganen und dem Abfluss. Auf Grund des nichtlinearen Verhaltens der Regelstrecke und der Regelorgane können k_R und T_N nicht analytisch bestimmt werden. Da eine Transformation in den Bildbereich nur unter großen Einschränkungen möglich ist (Arnold et al., 2012, in diesem Heft), müssen die Parameter k_R und T_N durch Simulationsrechnungen ermittelt werden.

Eine inverse Modellierung ist nicht möglich, wie in Abschnitt 2.4 erläutert wird (vgl. auch Schmitt-Heiderich 2009 und Gebhardt et al. 2010). Sowohl die Existenz konkurrierender Ziele, die deutlich voneinander abweichende Reglerparameter erfordern, als auch die fehlende eindeutige Beschreibbarkeit des Zieles machen eine mathematische Optimierung sehr schwierig. Die systematische Analyse möglicher Parameterkombinationen von k_R und T_N stellt hier eine Alternative zur mathematischen Optimierung dar, da die Rechnerleistungen heute nicht mehr limitierend sind.

Die Steuerung und Analyse zahlreicher Berechnungsvarianten erfordert eine Verwaltungsebene, aus der die Rechenläufe initialisiert und die Ergebnisse abgespeichert werden. Diese Verwaltungsebene wurde von der BAW in Form einer Datenbank realisiert und umfasst folgende Arbeitsschritte:

Schritt 1: Datenmanagement

Die Ermittlung günstiger Reglerparameter erfordert das Management einiger tausend Berechnungsvarianten. Hierfür wurde in der BAW ein datenbankgestütztes Verfahren entwickelt, bei dem die frei verfügbare Datenbank SQLite (www.sqlite.org) eingesetzt wird, für die eine Matlab-Schnittstelle „mksqlite“ als „public domain Software“ verfügbar ist (<http://developer.berlios.de/projects/mksqlite/>).

Schritt 2: Definition des Parameterraums

Der Parameterraum aus Kreisverstärkung und Nachstellzeit definiert ein Raster aus möglichen Parameterkombinationen. Beispielsweise wurden für die Untersuchung der Neckarstaustufe Hofen 17 unterschiedliche Proportionalanteile k_R mit 17 unterschiedlichen Nachstellzeiten T_N kombiniert. Damit ergaben sich $17 \times 17 = 289$ Parametersätze pro Abflusssituation, was einer Simulationszeit von etwa 4,6 Jahren entspricht, da nach Bild 1 jeder Parametersatz mit einer Simulationszeit von sechs Tagen im Modell getestet wird.

Schritt 3: Simulation des Regelverhaltens

Ausgehend von einer gegebenen Abflusssituation (Basisabfluss) werden Störungen im Zufluss derart eingebracht, dass unterschiedliche Sprünge um den Basisabfluss entstehen. Bild 1 A (blaue Linie) zeigt eine so generierte Zuflussganglinie um einen Basisabfluss von $100 \text{ m}^3/\text{s}$, die dem HN-Modell als Zuflussrandbedingung vorgegeben wird. Die Abflussrandbedingung am unteren Rand der Regelstrecke wird durch den Regler in jedem Zeitschritt neu ermittelt. Des Weiteren sind in Bild 1 A die Reaktionen von unterschiedlich parametrisierten Reglern dargestellt. Die resultierenden Wasserstände sowie der Sollwasserstand sind in Bild 1 B zu erkennen. Im Vergleich wird deutlich, dass der Regler mit $k_R = 600 \text{ m}^2/\text{s}$ die geringsten Regelabweichungen aufweist, was allerdings auch zu einer großen Anzahl von Stellbefehlen und einem unruhigen Abflussverhalten führt.

Eine instabile Regelung verstärkt die Wasserstands- und Abflussschwankungen und kann einen Berechnungsabbruch provozieren, da durch starke Schwankungen der Wasserstände und der Abflüsse numerisch instabile Zustände entstehen können. Parametersätze, die einen Berechnungsabbruch bewirken, werden für den entsprechenden Basisfluss als ungeeignet bewertet.

Schritt 4: Variation der Randbedingung

Da die Regelung alle Abflusssituationen beherrschen soll, müssen die Berechnungen für zahlreiche hydrologische Situationen (Basisabflüsse) wiederholt werden. Bei 20 untersuchten Basisabflüssen ergeben sich für das Beispiel Hofen 5780 Berechnungsvarianten oder etwa 92 Jahre Simulationszeit.

Schritt 5: Batch Processing

Die bei der Initialisierung der Datenbank festgelegten Reglerparameter und Abflussrandbedingungen werden

über ein „batch processing“ systematisch abgearbeitet. „Batch processing“ bedeutet das Ausführen einer Reihe von (unterschiedlichen) Programmen ohne menschliche Interaktion. Hierunter fällt die Initialisierung der Simulation, das Starten der Simulation, die Kontrolle des Ablaufs sowie die Speicherung und Auswertung der relevanten Daten in der Datenbank.

Schritt 6: Einfluss der Stellorgane

Sind die Stellgeschwindigkeiten nicht sicher bestimmbar, wegeabhängig oder ist die Bauwerkscharakteristik gänzlich unbekannt, werden die Arbeitsschritte 3 bis 5 bei geänderter Bauwerkscharakteristik wiederholt, um deren Einfluss auf die Reglerparameter bewerten zu können.

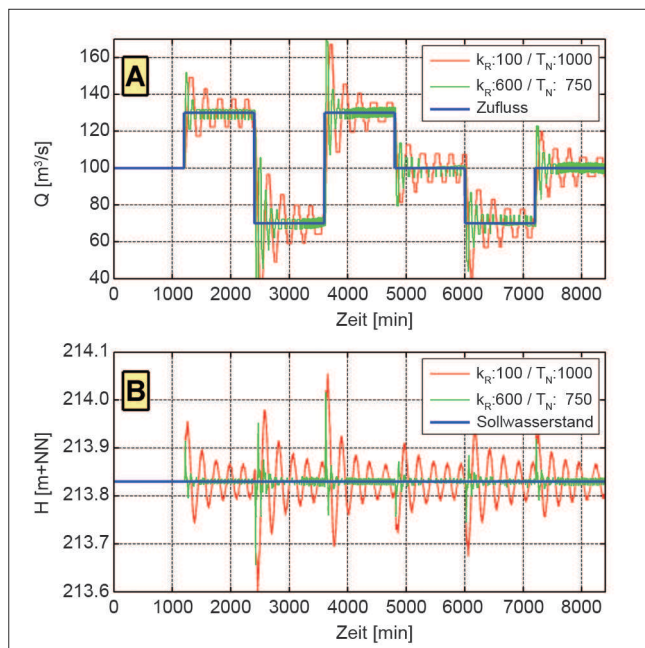


Bild 1: Ganglinien der Zu- und Abflüsse (A) und Wasserstände (B) infolge unterschiedlich parametrisierter Regler

Figure 1: Hydrographs of in- and outflow (A) and upstream water level (B) due to differently parameterised controllers

Entsprechend dem oben beschriebenen Verfahren werden die Ergebnisse aller stabil arbeitenden Reglervarianten, im Wesentlichen die Ganglinien von Zu- und Abfluss, die Wasserstandsganglinie am Referenzpegel sowie die Stellschritte der Stellglieder, in der Datenbank gespeichert. Ziel bei der weiteren Analyse ist es, die Regelgüte mit einer einheitlichen Vorgehensweise unter Berücksichtigung verschiedener Kriterien zu bewerten. Die Analyse erfolgt dabei abflussabhängig.

2.3 Festlegung der Bewertungskriterien

Definition of evaluation criteria

Im Rahmen der ASR kann eine Vielzahl an Bewertungskriterien angewandt werden, wobei die mathematische Formulierung für ein Kriterium nicht immer eindeutig ist. Dies wird am Beispiel des Vergleichs von Soll- und Istwasserstand in Gleichung (2) deutlich: Die Regelabweichung ΔH kann hier beispielsweise quadratisch (A), betragslinear (B), zeitgewichtet quadratisch (C) oder zeitgewichtet betragslinear (D) erfolgen, wobei weitere Kriterien definiert werden können. So kann ΔH beispielsweise über eine vierte Potenz gewichtet werden, womit größere Abweichungen stärker berücksichtigt werden. Wenn eine Regelung schnell arbeiten soll, können zeitlich später auftretende Abweichungen mit $t^{0.5}$, t , t^2 etc. gewichtet werden. Die unterschiedlichen Formulierungen der Zielfunktionen führen in der Regel auch zu einer Änderung der Bewertung.

$$A: Q_R = \int_{t=0}^{\infty} \Delta H^2(t) \cdot dt$$

$$B: Q_R = \int_{t=0}^{\infty} |\Delta H(t)| \cdot dt$$

$$C: Q_R = \int_{t=0}^{\infty} t \cdot \Delta H^2(t) \cdot dt \quad (2)$$

$$D: Q_R = \int_{t=0}^{\infty} t \cdot |\Delta H(t)| \cdot dt$$

Weitere Kriterien für den Wasserstand H sowie den Abfluss Q können wie folgt definiert werden:

- H : Anzahl der Nulldurchgänge (Schwingungsanregung durch häufigen Vorzeichenwechsel)
- H : Wahrscheinlichkeit des Überschreitens der oberen Stauzieltoleranz (Gefahr von Brückenanfahrungen)
- H : Wahrscheinlichkeit des Unterschreitens der unteren Stauzieltoleranz (Gefahr von Grundberührungen)
- Q : Anzahl der Stellbefehle (Bauwerksverschleiß)
- Q : Abweichung des Bauwerksabflusses gegenüber dem um die Laufzeit verschobenen Zufluss entsprechend der Gleichungen (2)
- Q : Anzahl der Über- bzw. Unterschwinger gegenüber dem zeitversetzten Zufluss (Vorzeichenwechsel)
- Q : Abflussmaximum (Überschwinger)

- Q: Abflussminimum (Unterschwinger)
- etc.

Ziele, die zueinander in Konkurrenz stehen, lassen sich nicht gleichzeitig optimal erfüllen, sodass vorab mit den Beteiligten eine Zielauswahl erfolgt und deren Anteile (Wichtung) für eine Gesamtbeurteilung festgelegt werden. Dabei sollten zur Wahrung der Übersicht möglichst wenige Ziele definiert werden, die sich aus den Anforderungen der untersuchten Fließstrecke und der vorhandenen Stellorgane ergeben. Ist beispielsweise die Gefahr von Brückenanfahrungen unkritisch, sollte die Stauzielüberschreitung nicht oder nur gering gewichtet werden. Schließlich ist der Erfüllungsgrad des Einzelziels zu bewerten und die Einzelbewertungen zu einer Gesamtbewertung zusammenzuführen.

2.4 Abflussabhängige Bewertung

Discharge-related evaluation

Die Bewertung der Regelgüte erfolgt in der Form, dass die Zeitreihen für jeden betrachteten Basisabfluss entsprechend den geforderten Kriterien analysiert und bewertet werden. Anschließend werden die Bewertungen der Einzelziele in Isoliniendarstellungen in Abhängigkeit von den Regelparametern Kreisverstärkung k_R und Nachstellzeit T_N aufgetragen und auf den Wertebereich 0 bis 10 normiert (vgl. Bild 2). Sofern die Bewertungen des Wasserstandes oder des Abflusses aus mehreren Kriterien gebildet werden, sind diese jeweils

zu einer Teilbewertung zusammenzufassen, aus der letztendlich die abflussabhängige Gesamtbewertung abgeleitet werden kann.

In Bild 2 sind exemplarisch für einen Basisabfluss von $100 \text{ m}^3/\text{s}$ die Teilbewertungen für Wasserstand (A) und Abfluss unter Berücksichtigung der Belastung des Stellorganes (B) sowie die Gesamtbewertung (C) dargestellt: Dabei bedeutet „0“ (blau), dass ein Ziel sehr gut erfüllt wird und „10“ (rot), dass es gar nicht erfüllt ist. Weiße Bereiche kennzeichnen Parameterkombinationen, die einen Berechnungsabbruch hervorrufen und in der Bewertung nicht berücksichtigt sind. Bei der Parametrisierung der Neckarstauhaltung Hofen wurden als Grundlage für die Isoliniendarstellungen $17 \times 17 = 289$ Berechnungsvarianten ausgewertet. Die Teilkriterien Wasserstand (A) und Abfluss und Stellorgan (B) wurden im vorliegenden Falle gleich bewertet, wobei grundsätzlich auch andere Wichtungen denkbar sind. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die einmal festgelegten Einzelkriterien und deren Wichtung für eine Stauhaltung nicht mehr geändert werden sollten.

Bild 2 verdeutlicht die Ziele einer OW/Q-Regelung, die zueinander in Konkurrenz stehen: Während sich bei dem Teilziel Wasserstand (A) gute Bewertungen für große Kreisverstärkungen K_R und kleine Nachstellzeiten T_N ergeben, ist es beim Teilziel Abfluss und Stellorgan (B) genau umgekehrt: Hier ergeben sich gute Bewertungen für kleine Nachstellzeiten und große Kreisverstärkungen. Daher führt der Parametersatz mit

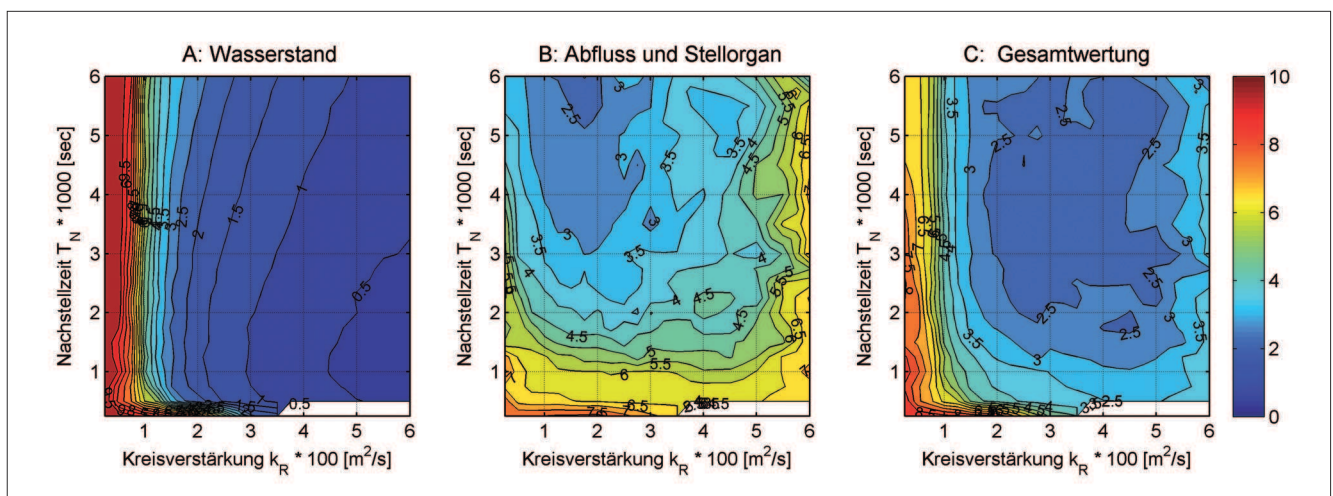


Bild 2: Bewertung für Wasserstand (A), Abfluss und Stellorgan (B) und resultierende Gesamtbewertung (C) bei einem Basisabfluss von $100 \text{ m}^3/\text{s}$

Figure 2: Evaluation of water level (A), discharge and final controlling element (B) and resulting overall assessment (C) given a base flow of $100 \text{ m}^3/\text{s}$

einer sehr guten Wasserstandsführung gleichzeitig zu einer erhöhten Belastung der Stellorgane. Dies muss für Wehre vermieden werden (Schmitt-Heiderich et al., 2012, in diesem Heft).

Eine Bewertung der Reglerparameter, wie sie in Bild 2 dargestellt ist, erfolgt intuitiv und erlaubt eine Diskussion mit allen Beteiligten auch ohne vertiefte Fachkenntnisse. Da die Wahl der Reglerparameter nicht immer eindeutig ist, sollte bei der Auswahl folgendes beachtet werden:

- Die Reglerparameter sollten nicht in der Nähe großer Gradienten (geringer Abstand der Isolinien) liegen, damit die Auswirkungen der Modellunsicherheiten minimiert werden.
- Die Isoliniendarstellungen in Bild 2 ermöglichen auch eine Sensitivitätsbetrachtung bei unsicheren Eingabegrößen. So kann beispielsweise der Einfluss der Verstellgeschwindigkeiten der Wehrverschlüsse auf die Regelgüte analysiert und bei der Festlegung der Reglerparameter berücksichtigt werden (z.B.: BAW, 2008).

Zusammenfassend zeigt Bild 3 schematisch den in Abschnitt 2 beschriebenen Ablauf bei der Bestimmung der abflussabhängigen Parameter. In einem ersten Schritt werden die relevanten Ganglinien aus einer

Vielzahl von Variantenrechnungen in einer Datenbank gespeichert (Abschnitt 2.2). Die Auswertung der unterschiedlichen Reglerparameter an Hand der in Abschnitt 2.3 beschriebenen Kriterien erlaubt es, die Regelgüte zu bewerten und die Reglerparameter k_R und T_N abflussabhängig festzulegen.

Die Individualität einer Stauhaltung im Regelkreis wird durch das HN-Modell der Regelstrecke, das Bauwerksmodell und das Modell der Leittechnik beschrieben. Die vorgestellte Vorgehensweise deckt den Normalbetrieb und damit den größten Anteil der Betriebstage pro Jahr ab. Unabhängig davon gibt es aber Sondersituationen, die weiterhin in Detailuntersuchungen analysiert werden, wie z. B.:

- Turbinenschnellschluss
- Umschalten von Kraftwerk- auf Wehrabfluss; gemeinsamer Betrieb zur Stauregelung
- Umschalten von Wehr- auf Kraftwerkabfluss
- historische Hochwassersituationen
- Schleusungen in Niedrigwasserzeiten
- Ermittlung von kritischen Schleusungszeiten
- Mischwassereinleitungen

Der Untersuchungsaufwand hängt vom individuellen Charakter jeder Stauhaltung ab und entzieht sich einer schematischen Bearbeitung.

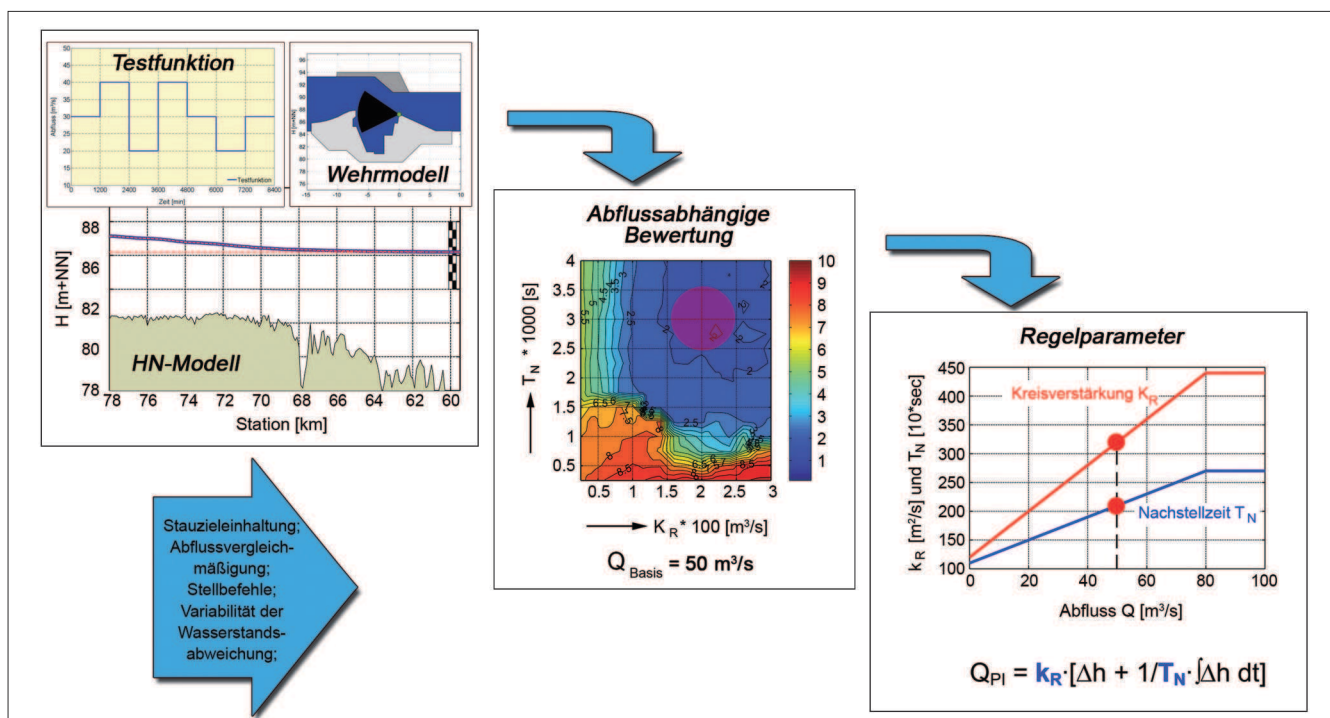


Bild 3: Ablaufdiagramm zur Bestimmung der abflussabhängigen Reglerparameter

Figure 3: Flowchart for determining the discharge-dependent control parameters

3 Adaption der Reglerparameter im Sonderfall einer Mischwassereinleitung

Adaptation of control parameters in the exceptional case of a combined sewer inflow

Exemplarisch für eine Sondersituation wird die Mischwassereinleitung aus dem Stadtgebiet von Stuttgart auf die Stauregelung betrachtet. Dies wird am Beispiel der Neckarstauhaltung Hofen erläutert, für die die Reglerparameter entsprechend dem in Kapitel 2 beschriebenen Verfahren bestimmt wurden. Eine Adaption des Wasserstandsreglers ermöglicht es, diese Sondersituation in der automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung zu berücksichtigen.

3.1 Lagebeschreibung

Description of the location

Die urbanen Einzugsgebiete Deutschlands werden i.d.R. künstlich entwässert, d.h. Niederschlagswasser wird über ein Misch- oder ein Regenwassernetz abgeleitet. Im Gegensatz zu natürlichen Einzugsgebieten gelangt das Wasser von der Oberfläche schnell in den

Kanal, wo es rasch abtransportiert wird, sodass wenig Retention in der Fläche stattfindet. Da die Kapazitäten von Kanalnetzen und angeschlossenen Kläranlagen begrenzt sind, müssen diese Wassermengen an geeigneten Stellen in die Fließgewässer entlastet werden. Diese kurzzeitigen Entlastungen können ein Vielfaches des aktuellen Gewässerabflusses betragen, was am Beispiel der Neckarstauhaltung Hofen im Stadtgebiet von Stuttgart gezeigt wird.

Die Länge des Stuttgarter Kanalnetzes beträgt etwa 1700 km. Es handelt sich dabei um ein Mischwassernetz, d. h. Schmutz- und Regenwasser werden im gleichen Kanal abgeleitet. Insgesamt liegen für das Stuttgarter Kanalnetz wasserrechtliche Einleitgenehmigungen in den Neckar von über 330 m³/s vor. Für die Stauhaltung Hofen bestehen Einleitgenehmigungen von 220 m³/s. Größter Einleiter ist dabei der Nesenbach mit einer genehmigten Einleitung in Höhe von 130 m³/s. Da der Nesenbach nahezu kein natürliches Einzugsgebiet aufweist, wirkt er wie ein Mischwassersammler, der über das Regenüberlaufbecken (RÜB) Schwanenplatz unterhalb der Wehranlage Cannstatt in die Stauhaltung Hofen entlastet. Das befestigte urbane Einzugsgebiet (A_{red}) des Nesenbaches umfasst etwa 20 km² und der 12,5 km lange Hauptsammler fällt von etwa 460 m+NN



Bild 4: Unterwasser des Wehres Cannstatt mit Einleitungsbauwerk des RÜB Schwanenplatz

Figure 4: Weir Cannstatt: View from downstream with inflow structure of the rainflood basin "Schwanenplatz"

auf 220 m+NN ab. Bei einem lokalen Starkregenereignis hält das RÜB Schwanenplatz ein Abflussvolumen von 18.000 m³ zurück. In Bild 4 ist das Einleitungsbauwerk des RÜB Schwanenplatz unterhalb der Wehranlage Cannstatt dargestellt.

Im Juli 2009 und Juli 2010 trafen schwere Unwetter auf das Stuttgarter Stadtgebiet. Die Stauverantwortung lag in diesen Monaten bei den Kraftwerksbetreibern, da der Abfluss im Neckar nur etwa 30 m³/s betrug, was deutlich kleiner ist als die Leistungsfähigkeit des Kraftwerks (60 m³/s). WSV und Kraftwerksbetreiber können im operativen Betrieb nicht auf die Starkniederschlagsereignisse reagieren, da weder der Leitwarte in Rockenau noch dem Personal der Stauanlage Hofen Informationen über die Mischwassereinleitung vorliegen. Eine solche „unbekannte“ Störgröße, die ein Vielfaches des Neckarabflusses betragen kann, stellt erhebliche Probleme für eine Wasserstandsregelung dar. Die BAW nahm dies zum Anlass, die Auswirkungen solcher Mischwassereinleitungen exemplarisch am größten Einleiter, dem Nesenbach, in einer Masterarbeit untersuchen zu lassen (Belzner, 2011).

3.2 Auswirkung der Mischwasserentlastung auf die Regelung der Stauhaltung Hofen

Effect of combined sewer overflows on the control of the Hofen impoundment

Das Stuttgarter Kanalnetz wird momentan von unterschiedlichen Ingenieurbüros hydrodynamisch berechnet, jedoch liegt noch keine Niederschlags-Abflussberechnung für das Einzugsgebiet des Nesenbaches vor. Zur Abschätzung des Entlastungsverhaltens wurde ein hydrologisches Modell für das urbane Einzugsgebiet des Nesenbaches erstellt, das mit Blockniederschlägen belastet wurde, die nach KOSTRA (DWD 2005) für unterschiedliche Jährlichkeiten ermittelt wurden. Daraus ergaben sich Größe und Dauer der Mischwassereinleitung in das Unterwasser der Stauanlage Cannstatt in Abhängigkeit der Jährlichkeit T [a] und Niederschlagsdauer D [min]. Bild 5 zeigt den zeitlichen Verlauf der Mischwassereinleitung in den Neckar exemplarisch für einstündige Niederschlagsereignisse in Abhängigkeit der Wiederkehrzeiten T . Der Niederschlag beginnt zum Zeitpunkt $t = 0$ min. Die Abbildung zeigt, dass es etwa 30 Minuten nach Niederschlagsbeginn zur Mischwasserentlastung in den Neckar kommt. Die

Mischwasserentlastung erreicht innerhalb von 60 bis 90 Minuten nach Niederschlagsbeginn ihr Maximum. Mit zunehmender Wiederkehrzeit steigt die Größe der Mischwassereinleitung an und erreicht einen rechnerischen Spitzenwert von 130 m³/s. In Folge eines 60-minütigen Niederschlags mit einer Jährlichkeit von $T=1a$ werden etwa 300.000 m³ Mischwasser in die Stauhaltung Hofen entlastet, bei einer Jährlichkeit $T=10a$ sind es 600.000 m³. Es wird deutlich, dass auch häufig wiederkehrende Niederschlagsereignisse die Neckarstauhaltung Hofen mit hohen Mischwassereinleitungen belasten.

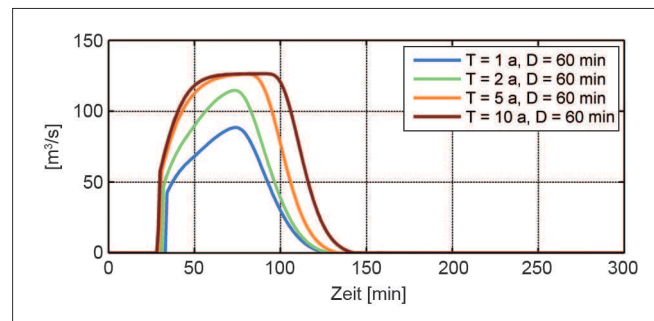


Bild 5: Größe und Dauer der zu erwartenden Mischwassereinleitung in Abhängigkeit der Niederschlagsdauer D [min] und Jährlichkeit T [a]

Figure 5: Size and duration of the expected combined sewage discharge as a function of rainfall duration D [min] and return period T [a]

Ein für die Stauhaltung Hofen erstelltes 1D-HN Modell wurde entsprechend des in Kapitel 2 beschriebenen Vorgehens parametrisiert. Die Parameter der Störgrößenaufschaltung wurden zwar ermittelt, bleiben jedoch bei der vorliegenden Fragestellung ohne Einfluss, da die Mischwasserentlastungsmengen als Zuflussgrößen der Regelung nicht bekannt sind. Der PI-Regler reagiert somit erst auf die Mischwassereinleitungen aus dem Nesenbach, wenn diese sich in einem Wasserstandsanstieg am Regelungspegel im Oberwasser der Staustufe Hofen bemerkbar machen. In Bild 6 sind die Wasserstandsverläufe im Oberwasser der Staustufe Hofen als Reaktion auf einstündige Mischwassereinleitungen mit Jährlichkeiten von ein und zehn Jahren dargestellt. Der Zufluss vom Oberlieger (Cannstatt) in die Stauhaltung Hofen wurde für die Berechnungen konstant mit 50 m³/s angenommen.

In Folge der Mischwassereinleitung durch den Nesenbach kommt es etwa 50 min nach Niederschlagsbeginn zu einem Anstieg des Oberwasserpegels der Staustufe

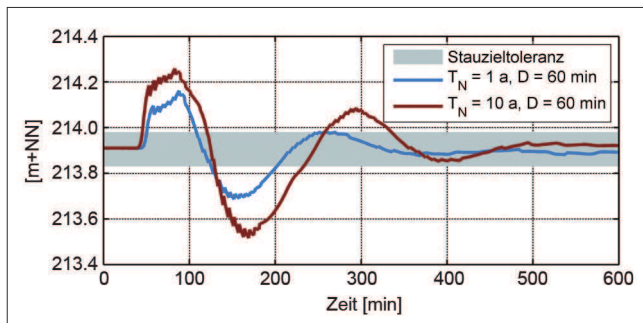


Bild 6: Oberwasserstand der Staustufe Hofen in Folge von Mischwassereinleitungen aus dem Nesenbach

Figure 6: Upstream water level at the Hofen weir as a result of the combined sewage discharge from the river Nesenbach

Hofen mit einer maximalen Stauzielüberschreitung von 25 cm (Bild 6). Auf diese Regelabweichung reagiert der Regler mit einer Erhöhung des Soll-Abflusses, die deutlich über dem Zuflussanstieg liegt (Bild 7). Die anfänglich hohe Regelabweichung bewirkt ein starkes Anwachsen des Integralanteiles, der bei Ende der Mischwassereinleitung weiter anwächst, bis er nach Unterschreiten des Stauziels langsam abgebaut wird. Der hohe Integralanteil fordert auch nach dem Ende der Mischwassereinleitung einen hohen Sollabfluss, was zu einer Stauzielunterschreitung (Unterschwinger) führt. Diese Stauzielunterschreitung ist betragsmäßig sogar größer als die vorangehende Überschreitung (maximal 30 cm nach Bild 6). Der Regler reagiert darauf mit einer drastischen Abflussreduzierung, was in der Praxis zu einer Kraftwerksabschaltung über einen Zeitraum von etwa einer Stunde geführt hätte (Bild 7).

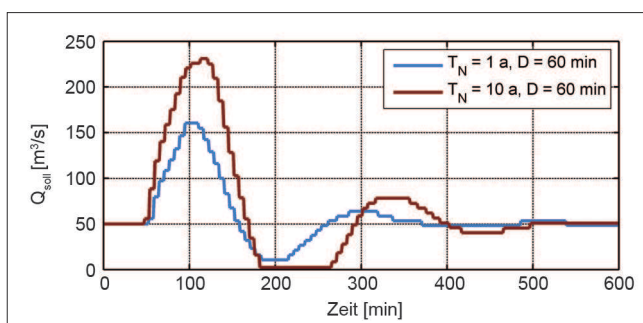


Bild 7: Abfluss über die Staustufe Hofen in Folge von Mischwassereinleitungen aus dem Nesenbach

Figure 7: Discharge over the Hofen weir as a result of the combined sewage discharge from the river Nesenbach

Der Vergleich von Bild 5 und Bild 7 verdeutlicht, dass die Abflussschwankungen durch die Wasserstandsregelung der Staustufe Hofen verstärkt werden. Die Mischwassereinleitung von maximal 130 m³/s wird in

der Spitze um etwa 50 m³/s erhöht, wodurch eine Stauzielunterschreitung von etwa 30 cm hervorgerufen und ein Kraftwerksstillstand provoziert wird. Es besteht die Gefahr, dass diese Abflussschwankungen in der Stauhaltungskette weiter verstärkt werden. Daher muss diese Regelungssituation als nicht zufriedenstellend bezeichnet werden.

3.3 Verbesserung der Regelungssituation Improvement of the control situation

Eine Verbesserung der Regelung kann nur dann erreicht werden, wenn der lokale Regler über die Mischwasserentlastung „informiert“ ist und die Regelungsstrategie entsprechend angepasst wird. Folgende Optionen sind denkbar: Da das RÜB Schwanenplatz vom TBA Stuttgart messtechnisch überwacht wird und damit der Zeitpunkt des Entlastungsbeginns bekannt ist, könnte diese Information perspektivisch dem Regler zur Verfügung gestellt werden. Des Weiteren sieht der Standard PI-Regler, wie er an der Mosel für die ASR entwickelt wurde, eine Empfindlichkeitslamelle mit einer oberen und einer unteren Grenze x_o und x_u vor, innerhalb der geänderte Reglerparameter angesetzt werden können (Bild 8).

Die Stauzielunterschreitung nach Bild 6 resultiert aus dem Integralanteil, der in Folge der Stauzielüberschreitung aufgebaut und erst bei Stauzielunterschreitung wieder langsam abgebaut wird. Dem kann beispielsweise durch eine schrittweise Erhöhung der oberen Empfindlichkeitsgrenze x_o auf einen Wert von ca. 40 cm begegnet werden, die durch den Beginn der Mischwasserentlastung ausgelöst wird. Die Nachstellzeit $T_{N,E}$ innerhalb der Empfindlichkeitslamelle wird dabei so groß gewählt ($T_{N,E} \rightarrow \infty$), dass der Regler bei Stauzielüberschreitung als reiner P-Regler arbeitet. Infolgedessen entsteht kein Integralanteil und das Unterschwingen wird vermieden. Allerdings entsteht ein gegenüber Bild 6 geringfügig größerer Überstau. Eine zusätzliche Erhöhung der Kreisverstärkung $k_{r,E}$ kompensiert den Überstau teilweise, sodass sich die Wasserstände nach Bild 9 einstellen.

Bild 9 zeigt die Wasserstandsverläufe im Oberwasser der Staustufe Hofen in Folge der Mischwasserentlastung aus dem Nesenbach mit und ohne Anpassung der Reglerparameter. Es entstehen weiterhin Stauzielüber-

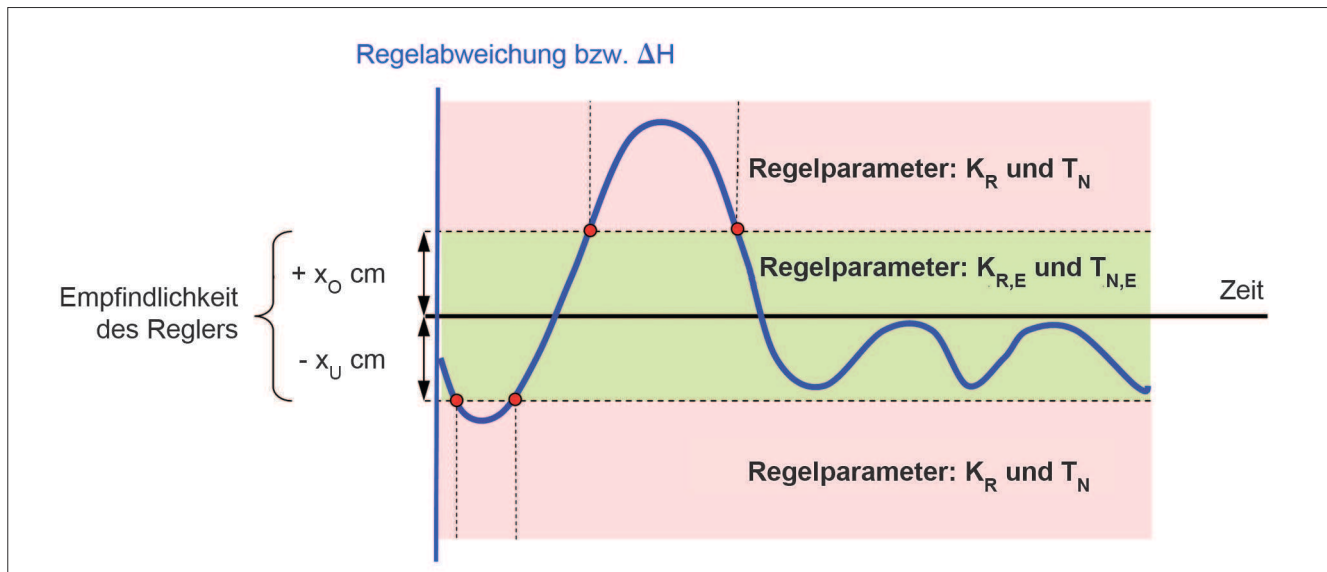


Bild 8: Schema der Regelabweichung mit Unempfindlichkeitslamelle

Figure 8: Diagram of the control deviation with sensitivity range

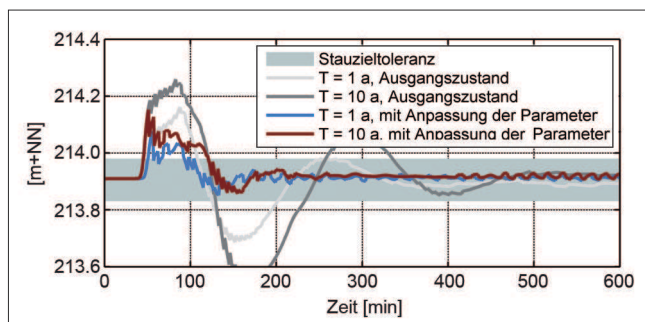


Bild 9: Verlauf des Wasserspiegels im Oberwasser der Staustufe Hofen bei Veränderung der Reglerparameter

Figure 9: Hydrograph of the upstream water level of the Hofen weir at different control parameters

schreitungen, eine darauf folgende Stauzielunter-schreitung wird jedoch vollständig vermieden. Sobald der Wasserstand das Stauziel wieder erreicht, kann die obere Empfindlichkeitsgrenze auf den ursprünglichen Wert zurückgeführt werden, sodass der Regler mit den Parametern weiterarbeitet, die für die hydrologisch bedingten „normalen“ Abflussschwankungen gewählt wurden.

Damit der Wasserstand entsprechend Bild 9 in einem engen Band gehalten wird, muss die Mischwassereinleitung zum Unterlieger „durchgereicht“ werden. Problematisch ist hierbei, dass dieser Effekt über die Stauhaltungskette verstärkt werden kann. Eine Dämpfung auf der Strecke kann hier nur über eine koordinierte Bewirtschaftung mehrerer Stauhaltungen erreicht werden.

Ein Vorteil der oben beschriebenen Regelungsstrategie ist es, dass einer Stauzielverletzung infolge eines unbekannten Zuflusses begegnet werden kann, ohne dass dessen Größe und Verlauf bekannt sind. Einzig die Information über den Beginn der Zuflussänderung ist erforderlich. Stauzielunterschreitungen werden damit vollständig vermieden. Stauzielüberschreitungen müssen jedoch teilweise hingenommen werden, sodass dieses Verfahren besonders für Fließstrecken geeignet ist, auf denen für Schiffe keine Gefahr von Brückenberührungen besteht und die Gefahr von Grundberührungen besonders kritisch zu bewerten ist.

Vor einer Umsetzung ist zu prüfen, ob die Stellorgane in der Lage sind, die durch die alleinige Wirkung der Kreisverstärkung entstehenden Sollwertvorgaben umzusetzen, da die Anzahl der Stellschritte insgesamt erhöht wird. Des Weiteren ist zu prüfen, wie diese Regelungsstrategie auf eine Fehlauslösung reagiert und es besteht Untersuchungsbedarf bezüglich der Parametrisierung der Empfindlichkeitsschwelle: In welchen Grenzen kann eine Änderung des P-Anteiles erfolgen und mit welcher Geschwindigkeit können die Empfindlichkeitsgrenzen des Reglers geändert werden?

4 Literatur *References*

Arnold, E., Schmitt-Heiderich, P., Sawodny, O. (2012): Parametrisierung von Reglern zur automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung (ASR) – Stand von Wissenschaft und Technik. In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 23-64.

Belzner, F. (2011): Einfluss der Mischwassereinleitung der Stadt Stuttgart bei sommerlichen Starkregenereignissen auf die Abfluss- und Stauzielregelung am Neckar. Masterthesis an der Hochschule Karlsruhe in Zusammenarbeit mit der BAW, WS 2011/2012.

Bundesanstalt für Wasserbau (2004): Numerische Simulation von Hydraulik und Leittechnik zur Optimierung der automatisierten Steuerung und Regelung von Wehren und Wasserkraftwerken. In: Tätigkeitsbericht der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Wasserbau im Binnenbereich, S. 54-58.

Bundesanstalt für Wasserbau (2008): Entwicklung und Simulation von Regelungsalgorithmen am Beispiel von Staustufen an Neckar und Mosel. In: Tätigkeitsbericht der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Wasserbau im Binnenbereich, S. 60-64.

Deutscher Wetterdienst (2005): Fortschreibungsbericht KOSTRA-DWD-2000. Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951 -2000). Offenbach am Main.

Gebhardt, M., Schmitt-Heiderich, P., Wohlfart, S. (2010): Automated operation of chains of barrages – development of controller algorithms with the use of model-based design. In: Proceedings of River Flow 2010 – International Conference on Fluvial Hydraulics, Braunschweig, 8. bis 10. September 2010, S. 1399-1406.

Gebhardt, M., Schmitt-Heiderich, P., Zhang, B. (2012): Einfluss von Messgrößen auf die Regelgüte und Möglichkeiten zur Filterung relevanter Informationen. In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 99-110.

Gebhardt, M., Wohlfart, S. (2012): Die automatische Regelung einer Stauhaltungskette – Von den Voruntersuchungen bis zur Inbetriebnahme der automatisierten Moselstaustufen. In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 135-144.

Schmitt-Heiderich, P. (2009): Modellgestützte Festlegung von Regelungsparametern. BAW-Brief Nr. 1, Juni 2009, www.baw.de.

Schmitt-Heiderich, P., Gebhardt, M. (2012): Der Einfluss der Regelstrecke Stauhaltung auf die Abfluss- und Stauzielregelung (ASR). In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 81-98.

Schmitt-Heiderich, P., Gebhardt, M., Wohlfart, S. (2012): Der Einfluss der Stellorgane auf die Abfluss- und Stauzielregelung (ASR). In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 65-80.

Wohlfart, S., Gebhardt, M. (2012): Automatisierung der Abfluss- und Stauzielregelung durch Model-Based Design und automatische Codegenerierung. In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 111-122.

